DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170337

严田蓉, 李旭毅, 李娜, 蒋明金, 杨志远, 何艳, 王春雨, 王海月, 马均. 氮肥运筹与栽植方式对杂交籼稻籽粒灌浆及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1485−1494

Yan T R, Li X Y, Li N, Jiang M J, Yang Z Y, He Y, Wang C Y, Wang H Y, Ma J. Effect of nitrogen management and cultivation method on grain-filling characteristics and grain yield of *indica* hybrid rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1485−1494

氮肥运筹与栽植方式对杂交籼稻籽粒灌浆及产量的影响*

严田蓉[1], 李旭毅[2], 李 娜[1], 蒋明金[1], 杨志远[1], 何 艳[1], 王春雨[1], 王海月[1], 马 均[1**]

(1. 四川农业大学水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室 温江 611130; 2. 四川省农业科学院作物研究所 成都 610066)

摘 要: 以杂交籼稻‘Ⅱ优 498’为材料, 在光温条件差异较大的四川省汉源和温江两地研究氮肥运筹方式[(基蘖肥与穗肥配比分别为 9∶1(N_1)、7∶3(N_2)和 5∶5(N_3)]与栽植方式[宽窄行栽培(C_1)、三角形栽培(C_2)、扩行减株栽培(C_3)、抛秧栽培(C_4)]对水稻库容量、籽粒灌浆充实及产量的影响, 探明光温特性、养分调控和栽植方式与水稻籽粒灌浆及产量形成的关系。结果表明: 1)光温优越的汉源地区水稻籽粒库容量、充实度、结实率和千粒重均优于温江, 籽粒的最初生长势较低, 达到灌浆峰值的日期推迟, 前、中期的灌浆强度较高, 历时久, 生长量占比亦较大, 且灌浆活跃期较长, 更易获得高产; 2)随着氮肥后移程度的增加, 水稻最大库容量呈减小趋势, 但籽粒的充实率、充实指数、库有效充实度、结实率和千粒重等均呈增加趋势, 籽粒最初生长势降低, 最大灌浆速率(G_{max})和平均灌浆速率(G_{mean})提高, 达到灌浆峰值的日期推迟、生长量占比增加, 灌浆历时缩短, 总体以氮肥适度后移(N_2)处理产量更高; 3)不同栽植方式在结实率和千粒重上的差异较小, 而在生物产量、最大库容量、灌浆特征参数和充实指标上存在较大差异, 各栽植方式在获得高产时存在相似的灌浆特性, 即库容量较大, 籽粒最初生长势较低, 达到灌浆峰值的日期延迟、生长量占比较大, G_{max}和G_{mean}较高, 宽窄行栽培、三角形栽培、扩行减株栽培和抛秧栽培分别在N_1、N_1、N_2和N_3条件下获得高产, 其中三角形栽培产量最优; 4)相关分析表明, 随着最大库容量的增大, 籽粒的最初生长势降低, 灌浆峰值期延后, 前、中期的灌浆历时与灌浆强度增加, 达灌浆峰值期的生长量比例亦增加, 且在前、中期的灌浆强度和前期的灌浆贡献率优势显著时更易获得高产。因此, 提高水稻产量应结合当地的生态条件并针对不同的栽植方式采取相应的氮肥运筹措施。

关键词: 水稻; 生态条件; 氮肥运筹; 栽植方式; 灌浆特性; 库容量; 产量

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)10-1485-10

Effect of nitrogen management and cultivation method on grain-filling characteristics and grain yield of *indica* hybrid rice*

YAN Tianrong[1], LI Xuyi[2], LI Na[1], JIANG Mingjin[1], YANG Zhiyuan[1], HE Yan[1],

---

* 国家粮食丰产科技工程(2006BAD02A05)和四川省农业产业体系建设项目资助
** 通讯作者: 马均, 主要研究水稻高产高效优质栽培。E-mail: majunp2002@163.com
严田蓉, 主要研究水稻高产高效优质栽培。E-mail: ytr0724@163.com
收稿日期: 2017-04-20 接受日期: 2017-05-24

* This study was supported by the National Food Science and Technology Project of China (2006BAD02A05) and the Agricultural Industrial System Construction Project of Sichuan Province.
** Corresponding author, E-mail: majunp2002@163.com
Received Apr. 20, 2017; accepted May 24, 2017

WANG Chunyu[1], WANG Haiyue[1], MA Jun[1**]

(1. Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Southwest Crop Physiology, Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China; 2. Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: The effects of nitrogen management [ratios of transplant-tiller to panicle of N-fertilizer were 9∶1 (N_1), 7∶3 (N_2) and 5∶5 (N_3)] and cultivation method (C_1, wide and narrow row cultivation; C_2, triangular cultivation; C_3, wide row and narrow space cultivation; and C_4, seedling-throwing cultivation) on sink potential, grain-filling properties and grain yield were studied in two widely variable ecological conditions (Wenjiang and Hanyuan in Sichuan Province) using *indica* hybrid rice 'II-you-498'. The aim of the study was to clarify the correlation among ecological conditions, nitrogen management and cultivation method with grain-filling properties and grain yield formation. The results were as follows: 1) Grain sink potential, grain plumpness, seed setting rate and 1000-grain weight in Hanyuan were better than those in Wenjiang. Furthermore, it was easy to have high yield with low initial growth vigor due to delayed date for peak grain-filling rate, high grain-filling rate and long grain-filling duration at early and middle stages and long active grain-filling period in Hanyuan. 2) With increasing nitrogen application ratio at the late stage, the maximum sink potential decreased while grain-filling indexes, seed setting rate and 1000-grain weight increased. The initial growth vigor reduced at grain-filling, and the maximum and mean grain-filling rates (G_{max} and G_{mean}) increased. Also, the time to reach peak grain-filling delayed with higher proportion of growth while the duration of grain-filling shortened. The highest yield was under N_2. 3) There were little differences in seed-setting rate and 1000-grain weight but significant differences in biomass yield, sink potential and grain-filling characteristics among different cultivation methods. For the highest yield performance under different cultivation methods, there were similar grain-filling characteristics, such as larger sink potential, lower initial growth vigor at grain-filling, delayed time to reach maximum grain-filling and higher G_{max} and G_{mean}. The wide and narrow row cultivation, triangule cultivation, wide row and narrow space cultivation and seedling-throwing cultivation had the highest yield when the ratio of transplant-tiller and panicle N-fertilizer was 9∶1, 9∶1, 7∶3 and 5∶5, respectively. Triangular cultivation had the highest yield among the four cultivation methods. 4) Correlation analysis showed that with increasing maximum sink potential, initial growth vigor at grain-filling and delayed time to reach maximum grain-filling rate decrease. The high grain yield obtained was attributed to increasing duration of grain-filling, grain-filling rate and growth increment, especially in the early and middle stages. Thus any further improvement in rice yield depended on local ecological conditions and cultivation methods, combined with optimized nitrogen management.

Keywords: Rice; Ecological condition; Nitrogen management; Cultivation method; Grain-filling characteristics; Sink potential; Grain yield

随着全球极端气候增多、自然资源减少且分布不均等问题日渐突出，粮食安全正面临着严峻挑战，大力发展水稻(*Oryza sativa*)生产，增加稻谷产量对确保粮食安全，维护社会稳定意义重大[1]。穗大粒多的库容优势和较高的生物产量是水稻高产的必要条件，且籽粒灌浆充实程度在一定程度上又制约着库容优势和产量潜力的发挥[2-3]。目前育种家已通过基因改良培育出了高秆大穗型品种，使水稻具备了“源”足“库”大的先天优势，但由于生态条件、栽植方式、肥料运筹等存在差异，仅依靠品种改良依然难以实现水稻稳定高产[4-5]。有研究表明，适宜的温光条件[6]、合理的水肥管理[7]以及因地制宜的栽植方式[8]等均能够在一定程度上促进籽粒灌浆充实，优化产量因子构成，从而增产。可见，在“源”足“库”大的基础上，保证“流”畅亦是水稻高产的重要条件。前人已从氮素调控[9]、水肥耦合[10]和温光管理[11]等方面对水稻籽粒灌浆充实开展了大量研究，但针对特定生态条件下，不同氮肥管理与栽植方式对水稻籽粒灌浆充实的影响鲜有报道。

四川地区地形条件特殊，水稻栽培长期以来实行宽窄行栽培、三角形栽培、扩行减株栽培和抛秧栽培并存的方式，氮肥管理对该地区水稻产量的影响亦较大。本试验在当地高产施氮量(180 kg·hm^{-2})条件下，分别在光温条件差异较大的温江和汉源两地，研究氮肥运筹与栽植方式对水稻籽粒灌浆特征和产量的影响，探明不同生态条件下，光温特性、养分调控和栽植方式对水稻籽粒灌浆及产量形成的影响差异，并探讨差异产生的原因，提出相应较优的氮肥运筹和栽植方式，为实现水稻高产高效栽培提供理论基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2010 年分别在光温条件差异较大的四

川省成都市温江区四川农业大学水稻研究所试验田(103.87°E, 30.71°N)和四川省汉源县九襄镇大庄村(102.63°E, 29.47°N)进行, 供试品种为杂交稻'II 优 498'。两生态点前茬作物均为大蒜(*Allium sativum*), 土壤类型为砂壤土, 试验地土壤基础养分含量及水稻生育阶段气象数据见表 1。

表 1 温江和汉源两生态点土壤养分含量基本情况和水稻生育阶段气象数据
Table 1 Soil nutrients contents and meteorological data in rice growing period (from March to September) at Wenjiang and Hanyuan

地点 Location	土壤养分含量 Nutrient content of soil							海拔 Altitude (m)	3—9 月份气象资料 Meteorological data from March to September			
	有机质 Organic matter ($g·kg^{-1}$)	速效氮 Available N ($mg·kg^{-1}$)	速效磷 Available P ($mg·kg^{-1}$)	速效钾 Available K ($mg·kg^{-1}$)	全氮 Total N ($g·kg^{-1}$)	全磷 Total P ($g·kg^{-1}$)	全钾 Total N ($g·kg^{-1}$)		平均气温 Average temperature (℃)	日照时数 Sunshine hours (h)	太阳总辐射量 Gross solar radiation ($J·m^{-2}$)	降雨量 Precipitation (mm)
温江 Wenjiang	26.99	97.31	60.95	49.97	1.56	0.246	13.51	530	20.1	360	2 253	931.6
汉源 Hanyuan	21.56	103.19	65.68	42.76	1.73	0.260	14.04	1 000	19.8	673	3 015	739.0

两生态点试验均采用两因素裂区设计。以氮肥运筹方式为主区, 栽植方式为副区。氮肥运筹方式在 180 $kg·hm^{-2}$施氮水平的基础上, 设基蘖肥与穗肥比例分别为 9∶1 (N_1)、7∶3 (N_2)和 5∶5 (N_3)。栽植方式分别为宽窄行栽培[C_1, 栽植规格: (40+26.7) cm×16.7 cm]、三角形栽培(C_2, 栽植规格: 40 cm×40 cm, 穴内按株距 10 cm 呈三角形栽 3 株)、扩行减株栽培(C_3, 栽植规格: 33.3 cm×16.7 cm)和抛秧栽培(C_4, 1.8×10^5 株$·hm^{-2}$), 4 个处理密度基本一致(1.8×10^5 株$·hm^{-2}$)。小区面积为 15.0 m^2, 小区之间筑 30 cm 宽田埂并用地膜覆盖以防止水肥流串, 3 次重复。

1.2 田间管理

试验中氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)用量分别为 180 $kg·hm^{-2}$、90 $kg·hm^{-2}$ 和 180 $kg·hm^{-2}$。其中, 磷肥全做底肥, 钾肥按基肥与穗肥配比 2∶1 进行, 氮肥施用按试验设计进行。基肥和蘖肥分别于移栽前 1 d 和移栽后 7 d 施用, 穗肥则在拔节后 15 d 施用。温江和汉源两地分别在 4 月 2 日和 3 月 25 日旱育秧, 5 月 11 日和 5 月 9 日移栽, 收获日期分别为 9 月 7 日和 9 月 16 日。水分管理: C_1、C_3 和 C_4 从移栽到无效分蘖期田间一直保持 2~3 cm 水层到晒田, 穗分化时复 3 cm 水层, 而 C_2 则从移栽后按照"1 cm 水层—自然落干—1 cm 水层"反复进行至分蘖后期晒田, 之后控制 1~2 cm 水层至抽穗期。抽穗后所有处理均采用干湿交替灌溉至成熟前 7 d 排水, 4 种栽培方式的用水量基本一致。此外, 其余田间管理措施各处理均保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 籽粒灌浆动态

于始穗期各处理选择田间生长一致的稻株, 标记 100~150 个抽穗情况一致、穗型差异较小的稻穗。在开花后每隔 3~6 d 各小区随机取 8 个穗, 并随机取穗中部籽粒 200~300 粒。经杀青、烘干后, 剔除未受精空粒, 其余粒去壳称重, 计为 W。

1.3.2 考种与计产

成熟期各小区随机调查30穴, 计算单位面积有效穗数。避开前期取样点, 各处理按平均有效穗数取5株生长健壮且长势一致的水稻, 去根后, 于105 ℃下杀青1 h, 75 ℃下烘干至恒重, 计算地上部干物质累积量。另取5株长势一致的水稻考察每穗粒数、千粒重和结实率。各小区去边行后, 全小区实收单晒, 按实收株数计产。

1.3.3 籽粒充实分析

在刘建丰等[12]方法的基础上将1.3.2中考种后的水稻实粒用比重为1.1 $g·mL^{-1}$的盐水进行分级, 分为饱粒(比重>1.1)与半饱粒(比重<1.1)。受精粒以总实粒数计, 经盐水分级烘干后测定饱粒千粒重, 同时根据1.3.2测得的实粒千粒重计算充实率和充实指数。

1.4 参数计算

按朱庆森等[13]的方法用 Richards 方程分析灌浆特征:

$$W=A/(1+Be^{-Kt})^{1/N} \tag{1}$$

式中: W 代表各时期受精粒烘干后的平均米粒质量(因变量); t 代表各取样时间与开花当日间隔天数(自变量); A、B、K 和 N 均为参数, A 表示预测可达到的最大生长量, B 表示初值参数, K 表示生长速率参数, N 表示形状参数; 同时以决定系数 R^2 来检验其配合程度。

对式(1)一阶求导, 可得到单位时间内的籽粒生长量, 记为生长速率 G:

$$G=AKBe^{-Kt}/[N(1+Be^{-Kt})^{(N+1)/N}] \text{或} G=(KW/N)[1-(W/A)^N] \tag{2}$$

对式(1)二阶求导, 可得生长速率(G)随时间(t)

而变化的速率：

$$G/t=(AK^2Be^{-Kt})\ (Be^{-Kt}-N)/[N^2(1+Be^{-Kt})^{(2N+1)/N}] \quad (3)$$

灌浆特征指标包括：最初生长势(R_0)；最大生长速率(G_{max})和获得 G_{max} 的时间($t_{max\cdot G}$)，将 $t_{max\cdot G}$ 代入式(2)和式(1)中可分别求得最大生长速率 G_{max} 和此时的生长量($W_{max\cdot G}$)；I，$W_{max\cdot G}$ 占生长终值量(A)的百分比；整个生长过程中的平均生长速率(G_{mean})；活跃灌浆期(D)。

$$R_0=K/N \quad (4)$$

$$t_{max\cdot G}=(\ln B-\ln N)/K \quad (5)$$

$$G_{mean}=AK/(4N+4) \quad (6)$$

$$D=2(N+2)/K \quad (7)$$

根据 G/t 方程求得两个时间拐点，记为 t_1、t_2，代表灌浆过程中粒重曲线明显变化的两个时刻，同时以达到最终粒重 99%的天数为有效灌浆期，记为 t_3，并以此 3 点记为籽粒灌浆的前、中、后 3 个时期终止点。用 T_1、T_2、T_3 分别表示籽粒前、中、后期的灌浆历时，W_1、W_2、W_3 分别表示籽粒在 t_1、t_2、t_3 时的粒重，对应求得前、中、后期的平均灌浆速率 MGR_1、MGR_2、MGR_3，分别为：

$$MGR_1=W_1/T_1 \quad (8)$$

$$MGR_2=(W_2-W_1)/T_2 \quad (9)$$

$$MGR_3=(W_3-W_2)/T_3 \quad (10)$$

参照杨志远等[14]方法计算前、中和后期时间段内灌浆物质对总灌浆物质的贡献率 RGC_1、RGC_2、RGC_3，分别为：

$$RGC_1=W_1/A\times100\% \quad (11)$$

$$RGC_2=(W_2-W_1)/A\times100\% \quad (12)$$

$$RGC_3=(W_3-W_2)/A\times100\% \quad (13)$$

籽粒库容及充实指标的计算公式如下：

库容量($t\cdot hm^{-2}$)=单位面积穗数(hm^{-2})×每穗粒数×饱粒千粒重(g)×10^6 (14)

充实率=受精粒平均千粒重(g)/饱粒千粒重(g)×100% (15)

库有效充实度(%)=籽粒产量($t\cdot hm^{-2}$)/库容量($t\cdot hm^{-2}$) (16)

充实指数(%)=结实率×充实率 (17)

1.5 数据处理

用 Microsoft Excel 2007 软件、DPS 6.55 进行数据分析及表格绘制，并用最小显著差异法(least significant difference, LSD)检验处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 两地不同氮肥运筹和栽植方式对水稻产量的影响

汉源生态点水稻产量、结实率、千粒重及生物产量均高于温江生态点(表 2)。就不同氮肥运筹方式而言，随穗肥施用比例的增加，两生态点结实率和千粒重均呈增加趋势，而生物产量和籽粒产量的表现不尽相同，但综合而言，以 N_2 处理对提高水稻籽粒产量及生物产量更为有利。栽植方式对两生态点各施氮处理水稻结实率和千粒重影响均较小，但对籽粒产量和生物产量的影响易因穗肥施用比例的不同而表现出一定差异。在 N_1 条件下，C_1 和 C_2 处理产量和生物产量均最高，尤其是 C_2 处理，其籽粒产量和生物产量均显著高于 C_3、C_4；在 N_2 条件下，不同栽植方式间籽粒产量表现为 $C_3>C_4>C_2>C_1$，而生物产量则表现为 $C_4>C_3>C_2>C_1$，且 C_3 处理显著高于 C_1 处理；N_3 条件下，栽植方式对两生态点籽粒产量影响趋势存在一定差异，但均以 C_4 方式下水稻籽粒产量和生物产量更高。可见，无论何种栽植方式，均需与其最适氮肥配比组合才能获得产量优势。

2.2 两地不同氮肥运筹和栽植方式对水稻籽粒库容及其充实指标的影响

汉源生态点水稻籽粒库容量、充实率、充实指数和库有效充实度较温江点分别平均高 2.06 $t\cdot hm^{-2}$、0.03、5.29%和 7.93%(表 3)。氮肥管理对各指标亦产生了较大影响，随穗肥后移程度的增加，两生态点库容量均呈减少趋势，充实率、充实指数和库有效充实度则呈增加趋势，其中汉源点充实率均高达 0.98 以上。此外，各栽植方式在不同氮肥运筹下的库容量和充实指标表现各不相同：在 N_1 条件下，生态点间的差异明显，温江点 C_1 和 C_2 处理的各项指标都显著高于 C_3、C_4，汉源点除充实率外，各项指标均在 C_2 下尤为突出；在 N_2 和 N_3 条件下，分别以 C_3 和 C_4 处理的库容优势显著，而对各充实指标的影响差异较小。表明不同氮肥运筹方式对不同栽植处理的库容量产生了较大的影响。

2.3 两地不同氮肥运筹和栽植方式对水稻籽粒灌浆特性的影响

用 Richards 方程将试验各处理的籽粒灌浆特征进行拟合，各方程的决定系数 R^2 均在 0.975 以上，说明用此方程对籽粒灌浆进行描述的可行性高(表 4)。生态条件对各参数产生了不同的影响，在汉源各处理的最初生长势(R_0)、最大灌浆速率(G_{max})总体低于温江点，灌浆峰值期($t_{max\cdot G}$)推迟，达到 G_{max} 时的生长量比例(I)有所增加，活跃灌浆期(D)较长，籽粒最大生长量(A)汉源点高于温江点，表明温光条件的改善，库容量的增大均能够使灌浆起始势降低，灌浆峰值期延后，前、中期的灌浆历时及强度明显增加，灌浆活跃期延长，最终单位籽粒接受的灌浆物

表 2　不同生态条件下氮肥运筹和栽植方式对水稻产量及结实的影响

Table 2　Effects of nitrogen managements and cultivation methods on rice yield and seed setting at different ecological conditions

氮肥运筹方式 Nitrogen management	栽植方式 Cultivation method	温江 Wenjiang 籽粒产量 Grain yield ($t \cdot hm^{-2}$)	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	生物产量 Biomass yield ($t \cdot hm^{-2}$)	汉源 Hanyuan 籽粒产量 Grain yield ($t \cdot hm^{-2}$)	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	生物产量 Biomass yield ($t \cdot hm^{-2}$)
N_1	C_1	9.93±1.86bc	89.10±2.06cde	29.55±0.62b	19.82±0.21a	12.21±1.86cde	93.11±0.22b	30.61±0.91abcd	24.66±0.25de
	C_2	10.53±2.15a	89.42±1.61bcde	29.98±0.53ab	20.04±0.39a	13.99±2.10a	94.05±3.06ab	30.69±0.98abcd	27.07±0.28a
	C_3	8.97±1.81ef	87.43±2.26de	29.55±0.62b	17.94±0.26cd	12.15±2.03de	90.88±1.63c	30.27±0.8cd	24.32±1.08de
	C_4	8.80±1.89f	87.20±2.43e	29.58±0.36b	18.79±0.18b	12.04±2.01e	91.63±0.16c	30.07±0.55d	25.45±1.07bc
平均 Average		9.56	88.29	29.67	19.15	12.6	92.42	30.41	25.38
N_2	C_1	9.47±1.62cde	89.90±0.99abcd	29.56±0.62b	18.52±1.12bc	12.51±1.87bcd	93.36±1.53ab	30.45±0.78bcd	24.02±0.25ef
	C_2	9.83±1.83bcd	91.08±2.6abc	30.02±0.54ab	18.65±0.18b	12.71±2.01bcd	94.12±2.31ab	30.94±0.51ab	24.94±0.25cd
	C_3	10.27±1.57ab	91.48±2.9 abc	29.88±0.57ab	19.80±0.09a	13.02±2.29b	93.64±2.7ab	31.07±1.59ab	25.46±1.07bc
	C_4	9.87±1.37bcd	92.02±3.45ab	29.87±0.57ab	19.82±0.21a	12.75±2.08bc	93.32±0.83ab	30.51±0.83abcd	25.91±0.26b
平均 Average		9.86	91.12	29.83	19.2	12.75	93.61	30.74	25.08
N_3	C_1	9.20±1.82ef	91.60±6.10abc	29.94±0.53ab	17.35±0.40d	12.05±1.27e	93.74±3.69ab	31.12±1.40a	23.02±0.23g
	C_2	9.30±1.64def	92.15±3.58a	30.11±0.57ab	17.52±0.26d	11.36±1.18f	94.19±2.79ab	30.52±0.84abcd	21.67±1.03h
	C_3	9.53±1.91cde	92.19±3.62a	30.43±0.76a	17.82±0.08d	12.06±1.64e	94.19±2.36ab	30.81±1.07abc	23.44±0.24fg
	C_4	10.27±1.46ab	92.26±3.69a	30.26±1.13ab	19.94±0.14a	12.34±1.55cde	94.44±4.39a	31.09±1.37ab	23.97±1.01ef
平均 Average		9.58	92.05	30.19	18.16	11.95	94.14	30.89	23.03

C_1：宽窄行栽培；C_2：三角形栽培；C_3：扩行减株栽培；C_4：抛秧栽培；N_1：基蘖肥∶穗肥=9∶1；N_2：基蘖肥∶穗肥=7∶3；N_3：基蘖肥∶穗肥=5∶5。同列不同字母表示不同氮肥运筹方式和不同栽植方式间在 0.05 水平差异显著。C_1: wide and narrow row cultivation; C_2: triangle cultivation; C_3: wide row and narrow space cultivation; C_4: seedling-throwing cultivation; N_1: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 9∶1; N_2: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 7∶3; N_3: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 5∶5. Data of different nitrogen fertilizer managements and different cultivation methods in the same column followed by different letters are significantly different at 0.05 level.

表 3　不同生态条件下氮肥运筹和栽植方式对水稻最大库容及其充实的影响

Table 3　Effects of nitrogen managements and cultivation methods on sink potential and its filling of rice at different ecological conditions

氮肥运筹方式 Nitrogen management	栽植方式 Cultivation method	温江 Wenjiang 库容量 Sink potential ($t \cdot hm^{-2}$)	充实率 Grain filling rate	充实指数 Filling index (%)	库有效充实度 Effective filling rate of sink (%)	汉源 Hanyuan 库容量 Sink potential ($t \cdot hm^{-2}$)	充实率 Grain filling rate	充实指数 Filling index (%)	库有效充实度 Effective filling rate of sink (%)
N_1	C_1	12.87±0.12b	0.96±0.00cd	85.31±1.78d	77.44±1.56d	14.06±0.21ef	0.99±0.00a	92.40±0.81a	86.90±0.38cde
	C_2	13.50±0.12a	0.97±0.01abcd	86.26±2.73d	77.82±1.21d	15.95±0.36a	0.99±0.01ab	93.00±0.96a	87.71±0.90bc
	C_3	12.39±0.12cd	0.93±0.01e	81.69±2.12e	72.73±0.47e	14.77±0.42b	0.99±0.01ab	89.78±0.80c	82.28±0.76g
	C_4	12.43±0.07c	0.93±0.01e	81.06±2.69e	70.85±3.11f	14.22±0.01de	0.99±0.010a	91.04±0.90b	84.71±0.43f
平均 Average		12.80	0.95	83.58	74.71	14.75	0.99	91.56	85.4
N_2	C_1	12.13±0.41e	0.96±0.00bcd	86.24±0.77d	78.05±1.28d	14.03±0.13f	0.99±0.01a	92.81±0.33a	89.19±0.50a
	C_2	12.06±0.11e	0.97±0.00abcd	88.33±0.12bc	81.71±0.82bc	14.34±0.28cd	0.99±0.01a	93.18±0.30a	88.58±0.49ab
	C_3	12.43±0.08c	0.97±0.00abc	89.06±0.18abc	82.42±0.14b	14.87±0.33b	0.99±0.00a	92.71±0.42a	87.58±0.78bcd
	C_4	12.17±0.21de	0.96±0.00d	87.95±0.14c	80.98±0.36bc	14.45±0.13c	0.99±0.00ab	92.28±0.59a	88.23±0.52ab
平均 Average		12.20	0.96	87.9	80.79	14.42	0.99	92.74	88.4
N_3	C_1	11.42±1.02g	0.96±0.00abcd	88.02±0.78bc	80.40±0.52c	13.93±0.13fg	0.99±0.00ab	92.37±0.56a	86.49±0.56de
	C_2	11.52±0.94fg	0.97±0.00abcd	89.58±0.53ab	80.72±0.44c	12.91±0.16h	0.99±0.01ab	92.80±0.81a	87.99±1.17bc
	C_3	11.69±0.13f	0.98±0.01ab	90.05±0.89a	81.36±0.53bc	13.77±0.14g	0.98±0.01ab	92.72±0.33a	87.60±0.80bcd
	C_4	12.19±0.11de	0.98±0.00a	90.20±0.18a	84.11±0.11a	14.27±0.03cd	0.98±0.01b	92.20±0.86ab	86.46±0.58e
平均 Average		11.71	0.97	89.46	81.65	13.72	0.98	92.52	87.14

C_1：宽窄行栽培；C_2：三角形栽培；C_3：扩行减株栽培；C_4：抛秧栽培；N_1：基蘖肥∶穗肥=9∶1；N_2：基蘖肥∶穗肥=7∶3；N_3：基蘖肥∶穗肥=5∶5。同列不同字母表示不同氮肥运筹方式和不同栽植方式间在 0.05 水平差异显著。C_1: wide and narrow row cultivation; C_2: triangle cultivation; C_3: wide row and narrow space cultivation; C_4: seedling-throwing cultivation; N_1: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 9∶1; N_2: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 7∶3; N_3: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 5∶5. Data of different nitrogen fertilizer managements and different cultivation methods in the same column followed by different letters are significantly different at 0.05 level.

表 4 不同生态条件下氮肥运筹和栽植方式对水稻灌浆过程的 **Richards** 方程参数估计和灌浆特征参数的影响

Table 4 Effects of nitrogen managements and cultivation methods on parameters of Richards equation and grain-filling parameters of rice at different ecological conditions

氮肥运筹方式 Nitrogen management	栽植方式 Cultivation method	A [g·(100-grains)$^{-1}$]	B	K	N	R^2	R_0	$t_{max·G}$ (d)	G_{max} [g·(100-grains)$^{-1}$·d^{-1}]	I (%)	G_{mean} [g·(100-grains)$^{-1}$]	D (d)
温江 Wenjiang												
N_1	C_1	2.247	1.280	0.216	0.178	0.978	1.209	9.134	0.164	39.846	0.111	20.20
	C_2	2.209	4.877	0.262	0.331	0.981	0.794	10.260	0.184	42.148	0.124	17.77
	C_3	2.204	1.160	0.201	0.172	0.975	1.168	9.516	0.150	39.741	0.102	21.65
	C_4	2.185	0.638	0.202	0.098	0.983	2.068	9.265	0.155	38.517	0.105	20.74
N_2	C_1	2.291	3.538	0.259	0.290	0.982	0.892	9.681	0.191	41.553	0.129	17.71
	C_2	2.259	4.091	0.268	0.262	0.990	1.023	10.257	0.197	41.141	0.134	16.89
	C_3	2.274	5.862	0.274	0.380	0.979	0.721	9.997	0.193	42.842	0.131	17.39
	C_4	2.254	2.255	0.232	0.222	0.980	1.046	10.002	0.173	40.527	0.118	19.16
N_3	C_1	2.289	4.239	0.258	0.314	0.981	0.824	10.077	0.189	41.904	0.128	17.91
	C_2	2.290	2.756	0.262	0.190	0.993	1.380	10.208	0.202	40.028	0.137	16.71
	C_3	2.290	4.916	0.239	0.360	0.980	0.665	10.919	0.172	42.568	0.116	19.72
	C_4	2.263	4.588	0.257	0.323	0.988	0.796	10.335	0.185	42.033	0.125	18.08
汉源 Hanyuan												
N_1	C_1	2.670	1.823	0.186	0.270	0.993	0.687	10.292	0.161	41.262	0.109	24.47
	C_2	2.689	6.536	0.221	0.483	0.975	0.457	11.809	0.177	44.225	0.119	22.51
	C_3	2.645	1.764	0.181	0.255	0.984	0.711	10.696	0.157	41.029	0.106	24.91
	C_4	2.570	1.303	0.179	0.204	0.979	0.877	10.374	0.154	40.248	0.104	24.65
N_2	C_1	2.715	3.851	0.206	0.382	0.980	0.539	11.209	0.174	42.875	0.117	23.12
	C_2	2.697	6.235	0.222	0.419	0.988	0.529	12.191	0.183	43.373	0.124	21.83
	C_3	2.649	6.978	0.225	0.482	0.977	0.467	11.887	0.178	44.207	0.120	22.07
	C_4	2.662	3.306	0.198	0.329	0.981	0.601	11.683	0.167	42.124	0.113	23.58
N_3	C_1	2.745	9.534	0.238	0.575	0.979	0.414	11.792	0.188	45.384	0.127	21.63
	C_2	2.718	11.187	0.245	0.507	0.990	0.482	12.644	0.197	44.535	0.133	20.49
	C_3	2.685	9.528	0.238	0.532	0.979	0.448	12.115	0.187	44.847	0.126	21.26
	C_4	2.718	13.066	0.242	0.603	0.984	0.402	12.692	0.188	45.723	0.127	21.48

A: 籽粒最终生长量; B、K、N: Richards 方程参数; R^2: 方程的决定系数; R_0: 最初生长势; $t_{max·G}$: 达到最大灌浆速率的时间; G_{max}: 籽粒最大灌浆速率; I: 达到最大灌浆速率时生长量比例; G_{mean}: 籽粒平均灌浆速率; D: 活跃灌浆期(籽粒重量 5%~95%)。C_1: 宽窄行栽培; C_2: 三角形栽培; C_3: 扩行减株栽培; C_4: 抛秧栽培; N_1: 基蘖肥∶穗肥=9∶1; N_2: 基蘖肥∶穗肥=7∶3; N_3: 基蘖肥∶穗肥=5∶5。A: growth capacity of a kernel; B, K, N: parameters of the Richards equation; R^2: determination coefficient of the regression equation; R_0: the initial grain-filling power; $t_{max·G}$: the time reaching the maximum grain-filling rate; G_{max}: the maximum grain-filling rate of a kernel; I: percentage of W_{max} to A; G_{mean}: the mean grain-filling rate of a kernel; D: active grain-filling period (from 5% to 95% of a kernel weight). C_1: wide and narrow row cultivation; C_2: triangle cultivation; C_3: wide row and narrow space cultivation; C_4: seedling-throwing cultivation; N_1: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 9∶1; N_2: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 7∶3; N_3: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 5∶5.

质更多。随着氮肥后移程度的增加，各参数总体的变化趋势为：R_0降低，I、G_{max}和G_{mean}增加，$t_{max·G}$延后，D缩短，A提高。在不同栽植处理下，对应不同的氮肥运筹方式各参数的变化存在相似之处，表现为：C_2、C_3和C_4处理分别在N_1、N_2和N_3条件下，R_0最低，$t_{max·G}$最迟，I最大，G_{max}和G_{mean}较高。

由表 5 可知，就两生态点而言，汉源点各时期的灌浆历时和平均灌浆速率(MGR)均大于温江点，灌浆历时在中、后期差异较大，而 MGR 在前期差异较大。灌浆贡献率(RGC)在前期汉源点高于温江点，中期相近，后期低于温江点。

就不同氮肥管理而言，随着穗肥施用比例的增加，MGR 在前期呈减小趋势，中、后期在温江先增后减，在汉源呈增加趋势，但差异均较小；灌浆历时则表现为前期增加，中、后期及总历时缩短，RGC 的变化趋势与灌浆历时一致，且在中期灌浆贡献率最高，均在59%以上。可以看出穗肥施用比例的增加对 MGR 影响较小，对灌浆历时和 RGC 则具有明显的影响效应。

就不同栽植方式而言，RGC 在中期差异较小，在前期和后期差异较大，且因氮肥运筹的不同二者呈现出相反趋势。在 N_1 处理下，C_1 在前期的 MGR 最大，C_2 在前期的灌浆历时优势明显，RGC 在前期均较高；在 N2、N3 处理下，则分别以 C_3 和 C_4 灌浆进程中各特征参数综合优势更大。

2.4 水稻籽粒灌浆、充实及产量间的相关性

籽粒灌浆、充实及产量之间的相关分析见表 6，最大库容及其充实相关指标与产量及结实相关指标均极显著正相关。结实率和千粒重与前、中期灌浆历时均呈正相关，前期达极显著，与后期灌浆历时呈负相关，与各时期的 MGR 均呈显著或极显著正

表 5　不同生态条件下氮肥运筹和栽植方式对水稻籽粒灌浆前、中、后期持续天数、平均速率及贡献率的影响
Table 5　Effects of nitrogen managements and cultivation methods on rice grain-filling characteristics at early, middle and late grain-filling stages at different ecological conditions

氮肥运筹方式 Nitrogen management	栽植方式 Cultivation method	前期 Early stage 天数 Days (d)	前期 Early stage 平均速率 MGR [g·(100-grains)$^{-1}$·d^{-1}]	前期 Early stage 灌浆贡献率 RGC (%)	中期 Middle stage 天数 Days (d)	中期 Middle stage 平均速率 MGR [g·(100-grains)$^{-1}$·d^{-1}]	中期 Middle stage 灌浆贡献率 RGC (%)	后期 Late stage 天数 Days (d)	后期 Late stage 平均速率 MGR [g·(100-grains)$^{-1}$·d^{-1}]	后期 Late stage 灌浆贡献率 RGC (%)
温江 Wenjiang										
N_1	C_1	4.32	0.053	10.16	9.63	0.114	60.79	16.51	0.073	28.06
	C_2	6.08	0.045	12.46	8.37	0.111	60.41	13.35	0.079	26.13
	C_3	4.36	0.051	10.05	10.32	0.106	60.80	17.76	0.067	28.15
	C_4	4.30	0.045	8.88	9.93	0.107	60.91	17.77	0.068	29.21
N_2	C_1	5.50	0.049	11.85	8.37	0.120	60.52	13.60	0.083	26.62
	C_2	6.26	0.041	11.44	8.00	0.114	60.60	13.17	0.082	26.97
	C_3	5.92	0.051	13.18	8.15	0.119	60.26	14.72	0.084	25.57
	C_4	5.45	0.045	10.82	9.10	0.111	60.69	15.28	0.075	27.48
N_3	C_1	5.85	0.048	12.21	8.45	0.116	60.46	13.57	0.081	26.73
	C_2	6.23	0.038	10.33	7.96	0.115	60.76	13.57	0.082	27.90
	C_3	6.21	0.047	12.89	9.26	0.108	60.32	14.58	0.075	25.79
	C_4	6.07	0.046	12.34	8.52	0.113	60.43	13.64	0.079	26.23
汉源 Hanyuan										
N_1	C_1	4.50	0.069	11.56	11.58	0.120	60.58	18.99	0.075	26.86
	C_2	6.58	0.060	14.64	10.45	0.118	59.90	15.62	0.082	24.46
	C_3	4.79	0.062	11.32	11.81	0.115	60.62	19.50	0.073	27.06
	C_4	4.51	0.060	10.55	11.73	0.113	60.73	19.86	0.070	27.72
N_2	C_1	5.79	0.062	13.21	10.84	0.120	60.25	16.89	0.080	25.54
	C_2	7.09	0.052	13.73	10.20	0.115	60.13	15.65	0.081	25.14
	C_3	6.76	0.057	14.62	10.25	0.116	59.91	15.32	0.081	24.48
	C_4	6.13	0.054	12.43	11.11	0.113	60.41	17.73	0.075	26.15
N_3	C_1	6.82	0.064	15.89	9.95	0.124	59.55	14.33	0.087	23.56
	C_2	7.90	0.052	14.97	9.49	0.117	59.81	14.04	0.086	24.22
	C_3	7.20	0.057	15.31	9.82	0.118	59.72	14.39	0.085	23.97
	C_4	7.77	0.057	16.26	9.85	0.117	59.44	14.03	0.085	23.30

C_1: 宽窄行栽培; C_2: 三角形栽培; C_3: 扩行减株栽培; C_4: 抛秧栽培; N_1: 基蘖肥∶穗肥=9∶1; N_2: 基蘖肥∶穗肥=7∶3; N_3: 基蘖肥∶穗肥=5∶5。C_1: wide and narrow row cultivation; C_2: triangle cultivation; C_3: wide row and narrow space cultivation; C_4: seedling-throwing cultivation; N_1: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 9∶1; N_2: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 7∶3; N_3: the ratio of transplant-tiller to panicle N-fertilizer was 5∶5. MGR: mean grain-filling rate; RGC: ratio of the grain-filling contributed to the final grain weight.

表 6　水稻籽粒库容量及其充实指标、灌浆时间及平均速率与籽粒充实及产量的相关性
Table 6　Correlation coefficients of sink potential, grain-filling indexes and characteristics with seed setting rate, 1000-grain weight and grain yield of rice

指标 Index		结实率 Seed setting rate	千粒重 1000-grain weight	生物产量 Biomass yield	产量 Grain yield
库容量 Sink potential		0.474*	0.637**	0.955**	0.939**
充实率 Grain-filling rate		0.842**	0.777**	0.741**	0.818**
充实指数 Grain plumpness index		0.967**	0.861**	0.717**	0.811**
库有效充实度 Effective filling rate of sink		0.952**	0.840**	0.759**	0.843**
灌浆持续天数 Duration days of grain-filling	前期 Early stage	0.754**	0.710**	0.402	0.239
	中期 Middle stage	0.196	0.353	0.650**	0.761**
	后期 Late stage	−0.206	−0.093	0.287	0.459*
平均速率 Mean grain-filling rate	前期 Early stage	0.423*	0.535**	0.752**	0.777**
	中期 Middle stage	0.610**	0.495*	0.512*	0.415*
	后期 Late stage	0.664**	0.536**	0.294	0.115
灌浆贡献率 Ratio of the grain-filling contributed to the final grain weight	前期 Early stage	0.796**	0.832**	0.487*	0.634**
	中期 Middle stage	−0.759**	−0.829**	−0.479*	−0.610**
	后期 Late stage	−0.802**	−0.835**	−0.501*	−0.649**

*表示在 0.05 水平上显著相关; **表示在 0.01 水平上显著相关。* indicates significant differences at 0.05 level, ** indicates significant diffrences at 0.01 level.

相关。产量和生物产量与各期的灌浆历时均呈正相关，中期达极显著水平，与 MGR 呈正相关，前期极显著，中期显著，后期未达显著水平。而 4 个产量指标与 RGC 在灌浆前期均呈正相关，中、后期均呈负相关，结实率、千粒重及产量均达极显著水平，生物产量达显著水平。表明各灌浆时期的历时和 MGR 均以不同程度促进着产量形成，但相对较高的前期籽粒积累更利于高产形成。

从表 7 可知，库容量和充实率与 A、$t_{max·G}$和 D 均显著或极显著正相关，与 R_0 呈显著负相关，与 I 呈正相关，充实率达极显著水平，库容量与灌浆速率(G_{max}和 G_{mean})呈负相关，而充实率与之呈正相关，均未达显著水平。这表明库容量对籽粒灌浆产生了较大影响，在库容量增大的情况下，最初生长势降低，灌浆峰值推迟(即前、中期的灌浆时间延长，强度增加)，灌浆活跃期延长，籽粒最大生长量增加，从而提高结实率、千粒重和产量。但库容量与灌浆速率(G_{max} 和 G_{mean})呈负相关性，说明通过一定的措施进一步协调库容与籽粒灌浆的关系，对增产具有重要意义。

表 7　水稻灌浆特征参数与库容量及充实率的相关性

Table 7　Correlation coefficients of grain-filling parameters with sink potential and grain-filling rate of rice

指标 Index	A	R_0	$t_{max·G}$	G_{max}	I	G_{mean}	D
库容量 Sink potential	0.799**	−0.448*	0.591**	−0.284	0.389	−0.307	0.778**
充实率 Grain-filling rate	0.792**	−0.804**	0.719**	0.216	0.633**	0.194	0.445*

*表示在 0.05 水平上显著相关; **表示在 0.01 水平上显著相关。* indicated significant differences at 0.05 level, ** indicated significant differences at 0.01 level.

3　讨论

3.1　生态条件对水稻籽粒灌浆充实及产量的影响

植株进行物质积累的基础是光合作用，光照强度[15]、光照时间[16]及温度[17]等因素都可能对植株光合作用产生较大影响。水稻在光照较弱时，籽粒灌浆速率会不同程度地降低，空秕粒率大幅增加[11]；在日照时数不足时，光合作用制造的养分不能满足小穗的发育，半秕粒率增加[18]；光照强度和时间的不足造成的籽粒灌浆充实度差导致水稻产量较大幅度降低[18-19]。本研究结果表明，从总体上看，汉源生态点水稻籽粒库容量、籽粒充实度、结实率和千粒重均优于温江生态点，最终获得了较高产量。通过气象资料对比，汉源生态点太阳总辐射量更高，总光照时数更长，且水稻总生育时期比温江生态点长近 400 h，这就对物质的积累和籽粒的灌浆充实等提供了足够的物质基础和时间保障。同时汉源生态点的灌浆活跃期更长，达到灌浆峰值的日期推迟，前、中期的灌浆强度更高、历时更久，生长量占比也更大，而前、中期的灌浆强度对籽粒充实率、结实率、千粒重和产量等指标都有显著影响，故而灌浆强度的改善为高产的形成提供了更为有利的条件。

3.2　氮肥运筹对水稻籽粒灌浆充实及产量的影响

氮素是水稻生长发育所需的最重要的营养元素[20]，水稻各生育期对肥料的需求不同，合理的肥料运筹不仅能满足水稻生长发育的需求，为高产提供物质保障，同时还能提高肥料利用效率达到节肥效果。前人研究表明，不同时期施用的氮肥中以穗肥对水稻氮素吸收积累量的贡献最大[21]，相同施氮量下，增加穗肥施用比例，可以提高籽粒灌浆速率(G_{max} 和 G_{mean})[9]，有效促进稻穗发育[22]，增加粒重。针对不同的试验处理，氮肥后移程度不尽相同，研究表明基蘖肥与穗肥比例在 7.5∶2.5[23]、6∶4[24]、5∶5[25]、4∶6[26]等运筹模式下均可能获得高产。本研究结果显示，随着氮肥后移程度的增加，水稻最大库容量有减小趋势，但籽粒充实指标、结实率和千粒重等均有增加的趋势，适当的氮肥后移处理(N_2，基蘖肥∶穗肥=7∶3)可获得较高的籽粒产量。就本研究而言，增产的原因在于各灌浆特征参数在氮素穗肥施用量适当增加的条件下，均向着更利于籽粒充实和产量形成的方向发展，即最初生长势适当降低，灌浆速率(G_{max} 和 G_{mean})提高，灌浆峰值期延后，前、中期的灌浆历时和灌浆强度增加，最终有效提高了达灌浆峰值期的生长量比例。

3.3　氮肥运筹与最适栽植方式

栽植方式的改良可为水稻提供更好的生长发育条件，为获得高产提供可能[27-29]。本研究结果表明，同一氮肥运筹下各栽植方式在结实率和千粒重上的差异较小，而在生物产量、最大库容量、灌浆特征参数和充实指标上的差异较大，最终带来产量上的差异。宽窄行栽培和三角形栽培因其独特的株行配置形成有受光优势的田间群体结构[30]，更易在前期得到优势群体。在重施基蘖肥(N_1)条件下，宽窄行栽培和三角形栽培方式下生物产量增加，库容量扩大，为高产形成“源”足“库”大的基础；同时三角形栽培灌浆参数和充实指标优势明显，产量在所有处理中最高。随着氮肥后移程度的增加，宽窄行栽培和三

角形栽培的优势逐渐减弱。前人也有研究表明水稻在适当扩大行距时, 可改善植株形态特征, 使中后期的生产优势得到充分发挥[31-32]。凌启鸿[33]研究认为扩行与重施穗肥配套, 利于稳定穗数, 形成大穗, 得到优势群体。本研究表明, 相比其他栽培方式, 扩行减株栽培在 30%的穗肥条件下各项产量形成指标基本都处于最优状态, 产量优势明显。抛秧栽培因其不规则的栽培方式, 前期生长起步快、群体大[34], 植株后期易互相遮蔽, 导致通风透光性差[35]。本研究显示, 与其他栽植方式相比, 抛秧栽培在氮肥后移较多(N_3)条件下有利于其生物产量、库容量和籽粒灌浆充实等指标的优化, 产量优势亦明显, 且可防止前期群体过度生长, 这与前人研究结果相近。

4 结论

光温条件较好的汉源生态点和氮肥适当后移处理下, 水稻“源”足“库”大(生物产量高、库容量大), 且灌浆优势明显(灌浆速率高、前中期灌浆强度大及灌浆活跃期长等), 更利于形成高产。不同的氮肥运筹对不同栽植方式下籽粒灌浆充实及产量形成有较大影响。在重施基蘖肥(基蘖肥∶穗肥=9∶1)条件下, 宽窄行栽培和三角形栽培更具库容优势, 且籽粒灌浆充实更好, 产量优势明显; 在氮肥适当后移(基蘖肥∶穗肥=7∶3)处理下, 扩行减株栽培各项指标整体更优, 产量潜力激发更胜; 而在重施穗肥(基蘖肥∶穗肥=5∶5)处理下, 抛秧栽培更能突出产量优势。

参考文献 References

[1] 虞国平. 水稻在我国粮食安全中的战略地位分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009
Yu G P. Analysis of the strategic position of rice in China’s food security[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009

[2] 赵步洪, 张洪熙, 朱庆森, 等. 两系杂交稻籽粒充实不良的成因及其与激素含量的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 477–486
Zhao B H, Zhang H X, Zhu Q S, et al. Causes of poor grain plumpness of two-line hybrids and their relationships to contents of hormones in the rice grain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(3): 477–486

[3] Yang J C, Zhang J H. Grain-filling problem in ‘super’ rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(1): 1–5

[4] 杨建昌. 水稻弱势粒灌浆机理与调控途径[J]. 作物学报, 2010, 36(12): 2011–2019
Yang J C. Mechanism and regulation in the filling of inferior spikelets of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(12): 2011–2019

[5] Fu J, Xu Y J, Chen L, et al. Changes in enzyme activities involved in starch synthesis and hormone concentrations in superior and inferior spikelets and their association with grain filling of super rice[J]. Rice Science, 2013, 20(2): 120–128

[6] 史建国, 崔海岩, 赵斌, 等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4427–4434
Shi J G, Cui H Y, Zhao B, et al. Effect of light on yield and characteristics of grain-filling of summer maize from flowering to maturity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(21): 4427–4434

[7] 孙永健, 马均, 孙园园, 等. 水氮管理模式对杂交籼稻冈优 527 群体质量和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 2047–2061
Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, et al. Effects of water and nitrogen management patterns on population quality and yield of hybrid rice gangyou 527[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(10): 2047–2061

[8] 闫川, 丁艳锋, 王强盛, 等. 行株距配置对水稻茎秆形态生理与群体生态的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(5): 530–536
Yan C, Ding Y F, Wang Q S, et al. Effects of row-spacing on morphological and eco-physiological characteristics in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(5): 530–536

[9] 马均, 明东风, 马文波, 等. 不同施氮时期对水稻淀粉积累及淀粉合成相关酶类活性变化的研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 290–296
Ma J, Ming D F, Ma W B, et al. Changes in starch accumulation and activity of enzymes associated with starch synthesis under different N supplying date[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(2): 290–296

[10] 李俊周, 李磊, 孙传范, 等. 水氮互作对水稻籽粒充实及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(3): 42–47
Li J Z, Li L, Sun C F, et al. Effects of water-nitrogen interaction on rice grain plumpness and yield[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(3): 42–47

[11] 任万军, 杨文钰, 徐精文, 等. 弱光对水稻籽粒生长及品质的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 785–790
Ren W J, Yang W Y, Xu J W, et al. Effect of low light on grains growth and quality in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 785–790

[12] 刘建丰, 康春林, 伏军, 等. 水稻籽粒充实状况指标测定方法研究[J]. 作物研究, 1993, 7(1): 16–19
Liu J F, Kang C L, Fu J, et al. Study on the method of determining grain filling condition of rice[J]. Crop Research, 1993, 7(1): 16–19

[13] 朱庆森, 曹显祖, 骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析[J]. 作物学报, 1988, 14(3): 182–193
Zhu Q S, Cao X Z, Luo Y Q. Growth analysis on the process of grain filling in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 1988, 14(3): 182–193

[14] 杨志远, 孙永健, 徐徽, 等. 栽培方式与免耕对杂交稻Ⅱ优 498 灌浆期根系衰老和籽粒灌浆的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1347–1358
Yang Z Y, Sun Y J, Xu H, et al. Influence of cultivation methods and no-tillage on root senescence at filling stage and grain-filling properties of Eryou 498[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(7): 1347–1358

[15] 杜彦修, 季新, 张静, 等. 弱光对水稻生长发育影响研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1307–1317
Du Y X, Ji X, Zhang J, et al. Research progress on the impacts of low light intensity on rice growth and development[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(11): 1307–1317

[16] 杨虎, 戈长水, 应武, 等. 遮荫对水稻冠层叶片 SPAD 值及

光合、形态特性参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 580–587
Yang H, Ge C S, Ying W, et al. Effect of shading on leaf SPAD values and the characteristics of photosynthesis and morphology of rice canopy[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(3): 580–587
[17] 廖江林, 肖小军, 宋宇, 等. 灌浆初期高温对水稻籽粒充实和剑叶理化特性的影响[J]. 植物生理学报, 2013, 49(2): 175–180
Liao J L, Xiao X J, Song Y, et al. Effects of high temperature on grain-filling of rice caryopsis and physiological and biochemical characteristic of flag leave at early milky stage[J]. Plant Physiology Journal, 2013, 49(2): 175–180
[18] 李林, 张更生. 阴害影响水稻产量的机制及其调控技术Ⅱ. 灌浆期模拟阴害影响水稻产量的机制[J]. 中国农业气象, 1994, 15(3): 5–9
Li L, Zhang G S. Mechanism of insufficient illumination impact on rice yield and its controlling technology Ⅱ. Mechanism of impact of simulated insufficent illumination during the grain-filling period on rice yield[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1994, 15(3): 5–9
[19] 杨世民. 杂交水稻对生态环境和弱光胁迫的适应性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011
Yang S M. Study on the adaptability of ecological environment and low light stress of hybrid rice[J]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2011
[20] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095–1103
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095–1103
[21] 林晶晶, 李刚华, 薛利红, 等. ^{15}N 示踪的水稻氮肥利用率细分[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1424–1434
Lin J J, Li G H, Xue L H, et al. Subdivision of nitrogen use efficiency of rice based on ^{15}N tracer[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 1424–1434
[22] 陈小荣, 潘晓华, 陈忠平, 等. 施氮对籼型双季杂交水稻枝梗和颖花分化与退化的影响[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(1): 1–6
Chen X R, Pan X H, Chen Z P, et al. Effects of different nitrogen applications on the differentiation and retrogression of the branch and spikelet in ganxin688[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2008, 30(1): 1–6
[23] 殷春渊, 杨海霞, 杜彦修, 等. 水稻不同部位伤流强度的差异及其与籽粒充实的关系[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 153–163
Yin C Y, Yang H X, Du Y X, et al. Difference of bleeding intensity in different parts of rice plant and its relationship with grain plumpness[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(1): 153–163
[24] 陈军, 叶荣榕, 李程勋, 等. 不同氮肥运筹方式对水稻氮素利用率及产量的影响[J]. 福建农业学报, 2012, 27(7): 759–763
Chen J, Ye R R, Li C X, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on rice yield and nitrogen utilization efficiency[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2012, 27(7): 759–763
[25] 潘圣刚, 黄胜奇, 翟晶, 等. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 23–29
Pan S G, Huang S Q, Zhai J, et al. Effects of nitrogen rate and its basal to dressing ratio on uptake, translocation of nitrogen and yield in rice[J]. Soils, 2012, 44(1): 23–29
[26] 吕修涛. 氮肥运筹对水稻产量形成及氮素吸收利用的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2001
Lü X T. Effect of nitrogen application on the development of rice yield and nitrogen absorption and utilization[J]. Yangzhou: Yangzhou University, 2001
[27] 张荣萍, 马均. 栽培方式对粳型巨胚稻干物质积累和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(5): 228–233
Zhang R P, Ma J. Effects of cultivation regimes on dry matter accumulation and grain yield in japonica giant embryo rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(5): 228–233
[28] 赵甘霖, 丁国祥, 刘天朋, 等. 宽窄行和等行距栽培条件下高粱种植密度与产量的关系研究[J]. 农学学报, 2013, 3(8): 11–13
Zhao G L, Ding G X, Liu T P, et al. Studied on relationship on the sorghum density and yield under different width row space with narrow row space and same row space culture[J]. Journal of Agriculture, 2013, 3(8): 11–13
[29] 李娜娜, 李慧, 裴艳婷, 等. 行株距配置对不同穗型冬小麦品种光合特性及产量结构的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2869–2878
Li N N, Li H, Pei Y T, et al. Effects of allocations of row-spacing on photosynthetic characteristics and yield structure of winter wheat cultivars with different spike types[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(14): 2869–2878
[30] 万宜珍. 超级杂交稻强化栽培及改良技术的初步研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2003
Wan Y Z. Primary study on system of rice intensification and its improved techniques of super hybrid rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2003
[31] 王夫玉, 张洪程, 赵新华, 等. 行株距配比对水稻群体特征的影响[J]. 甘肃科学学报, 2001, 13(2): 38–42
Wang F Y, Zhang H C, Zhao X H, et al. Effect of ratio of row spacing to intrarow spacing on population character in rice[J]. Journal of Gansu Sciences, 2001, 13(2): 38–42
[32] Lin H X, Peng C R, Lei X L, et al. Effects of ratio of row spacing to intrarow spacing on yield and top three leaves of super high-yielding early and late rice[J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(1): 52–56
[33] 凌启鸿. 关于水稻轻简栽培问题的探讨[J]. 中国稻米, 1997, (5): 3–9
Ling Q H. Discussion on the light cultivation problem of rice[J]. China Rice, 1997, (5): 3–9
[34] 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 等. 中国抛秧稻作技术体系及其特征[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 43–52
Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, et al. Cultivation technical system of rice seedling broadcasting and its characteristics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 43–52
[35] 张祥明, 郭熙盛, 李泽福, 等. 氮肥运筹对抛秧栽培晚稻物质积累及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(11): 189–192
Zhang X M, Guo X S, Li Z F, et al. Effect of nitrogen management on matter production and yield of late rice cultivated by seeding-broadcast[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(11): 189–192